



Temporal Analysis and Intensity of Meteorological Drought (Case Study: Qaen City in South Khorasan Province)

Ali Rezvani^{1*}, Mahdi Khorashadizadeh¹, Mohsen Rezaei²

1- Assistant Professor, Department of Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil, Faculty of Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran.

*Corresponding Author: arezvani@buqaen.ac.ir

Keywords:

Meteorology, Drought, PNPI, SPI, Qaen city

Received:

30 Jul 2025

Revised:

29 Aug 2025

Accepted:

17 Sep 2025

Extended Abstract

Introduction

Drought is among the most severe and complex climate-related hazards, particularly in arid and semi-arid regions, where it strongly impacts water resources, agriculture, and food security. In eastern Iran, especially in South Khorasan Province, recent decades have witnessed frequent meteorological and hydrological droughts, resulting in groundwater depletion and reduced surface flows. Effective drought monitoring requires indices that accurately reflect regional climatic and hydrological conditions. Among the most widely applied indices are the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Percent of Normal Precipitation Index (PNPI), both of which are valued for their simplicity and reliability. Integrating multiple indices can further enhance the accuracy of drought assessments.

In recent years, various studies have employed drought indices and artificial intelligence (AI) models to evaluate drought intensity, duration, and frequency across different spatial and temporal scales. However, despite the growing body of research on drought in Iran, relatively few studies have simultaneously applied simple indices such as PNPI and SPI at the regional scale. Qaen, a dry city in eastern Iran, has been repeatedly affected by severe droughts in recent years. Nevertheless, no comprehensive long-term statistical analysis employing multiple drought indices has been conducted

How to cite this article:

Rezvani, A; Khorashadizadeh, M; & Rezaei, M. (2025). Temporal Analysis and Intensity of Meteorological Drought (Case Study: Qaen City in South Khorasan Province). *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 4(13), 105-130. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9807.1159>



for this region. The present study aims to investigate the temporal characteristics and severity of meteorological drought in Qaen over recent decades using the PNPI and SPI indices at different time scales. A better understanding of drought patterns will contribute to improved water resource management and reduced vulnerability of the region to future droughts.

Materials and Methods

The study area is Qaen City, located in South Khorasan Province in eastern Iran. According to the De Martonne aridity index, the region is classified as arid, while the Köppen climate classification identifies it as cold semi-arid (steppe). The mean annual precipitation is 161.3 mm, and the mean annual temperature is 14.9 °C. Precipitation data were obtained from the Qaen synoptic station (59°10'33" E, 33°44'24" N; elevation 1,432 m above sea level) for a 37-year period (1988–2024). This station provides the most reliable meteorological data in the region. Prior to analysis, data normality was tested using the Ryan–Joiner normality test, and potential outliers were evaluated using the interquartile range (IQR) method. Two indices were employed to assess meteorological drought: the PNPI and SPI. Temporal trends in annual precipitation and temperature were examined using simple linear regression, the Mann–Kendall test, and Sen’s slope estimator. The correlation and consistency between PNPI and SPI were evaluated using Pearson’s correlation coefficient. All statistical analyses and visualizations were performed using Minitab 16 and Microsoft Excel 2016. This methodological framework ensures a comprehensive understanding of drought dynamics in Qaen City.

Results and Discussion

Analysis of long-term precipitation and temperature data (1988–2024) from the Qaen synoptic station revealed an average annual precipitation of 161.3 mm, with the majority of precipitation occurring during the cold season. The PNPI results indicated that wet periods were primarily observed in the 1990s and in the water years 2005, 2019, and 2020, while severe and consecutive droughts were concentrated in the second half of the study period, particularly after 1999. The driest years were 2006, 2008, 2016, and especially 2021. Classification of years showed that over 41% fell into drought categories, whereas only 30% were categorized as extremely wet. These findings suggest that the region entered a prolonged phase of chronic drought in the early 2000s, and episodic wet years have been insufficient to compensate for persistent precipitation deficits. The SPI analysis corroborated these results. SPI-12 values fluctuated between +2.08 (2020) and –2.20 (2021). Most years (62.16%) fell into the normal class, while 2000, 2008, and 2021 were classified as severe to extreme droughts. The abrupt shift from extreme wetness in 2020 to extreme drought in 2021 highlights the pronounced climatic variability of the region. The seasonal

SPI analyses (SPI-6 and SPI-3) revealed that winter–spring was the most drought-prone season, directly affecting water resources and agricultural production, particularly barberry and saffron. Sensitivity analyses demonstrated that SPI results were robust against both outliers and the choice of statistical distribution, underscoring the reliability of the findings. A comparative evaluation of PNPI and SPI indicated that both indices were consistent in identifying extreme events. However, SPI provided more climatologically robust insights due to its normalization process, which accounts for precipitation variability. PNPI remains useful for rapid, preliminary assessments, while SPI is better suited for long-term drought monitoring. Together, these indices offer a comprehensive framework for understanding drought dynamics in arid and semi-arid regions and can inform more effective water and agricultural management strategies.

Conclusion

This study examined meteorological drought in Qaen City using 37 years of precipitation and temperature data (1988–2024) from the Qaen synoptic station. Two indices, PNPI and SPI, were applied to evaluate drought conditions. Trend analysis revealed no statistically significant change in precipitation but did show an increase in annual temperature, which has contributed to the intensification of drought. The results highlighted substantial interannual variability, with both extremely dry and extremely wet years recorded. While PNPI proved valuable for rapid drought assessment, SPI provided more robust classifications due to its statistical normalization. The findings emphasize the rising drought risk in Qaen, the predominance of recurrent droughts, and the increasing variability of climatic conditions. These results underscore the urgent need for enhanced drought monitoring systems, sustainable water resource management, and adaptive agricultural strategies. Integrating simple indices such as PNPI with statistically rigorous tools like SPI offers a comprehensive approach for assessing drought in arid and semi-arid environments.



تحلیل زمانی و شدت خشکسالی هواشناسی (مطالعه موردی: شهر قاین در استان خراسان جنوبی)

علی رضوانی^{۱*}، مهدی خراشادی‌زاده^۱، محسن رضائی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قاین، ایران
 ۲- استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
 *نویسنده مسئول: arezvani@buqaen.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی:

هواشناسی، خشکسالی، SPI، PNPI، شهر قاین

خشکسالی هواشناسی، به‌عنوان نخستین مرحله از فرآیند گسترده‌تر خشکسالی، از مخاطرات مهم اقلیمی است و پیامدهای گسترده‌ای برای پایداری زیست‌محیطی دارد. این پژوهش با هدف بررسی روند خشکسالی هواشناسی در شهر قاین واقع در استان خراسان جنوبی طی یک دوره ۳۷ ساله (سال آبی ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۴) انجام شده است. بدین‌منظور از داده‌های سالانه بارش و دما و دو شاخص درصد نرمال بارش (PNPI^۱) و بارش استاندارد شده (SPI^۲) برای تحلیل خشکسالی منطقه استفاده گردید. بر اساس نتایج، میانگین بارش سالانه برابر با ۱۶۱/۳۰ میلی‌متر منطقه (با ضریب تغییرات ۳۷٪)، بیانگر نوسانات شدید در بارندگی سالیانه و وقوع سال‌هایی با بارش‌های غیرعادی بالا یا پایین است. بررسی روند تغییرات بارندگی سالانه با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی، آزمون من-کندال و شیب‌سن، روند معناداری را در مقادیر بارش نشان نمی‌دهد. اما دمای میانگین سالانه با نرخ افزایش ۰/۰۷۸٪، روندی افزایشی و معنادار دارد. بر اساس SPI و PNPI به ترتیب حدود ۴۱٪ و ۱۶٪ از سال‌ها (به‌ویژه پس از سال ۱۹۹۹) در وضعیت خشکسالی قرار داشته‌اند و دوره‌های ترسالی بیشتر در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹ و ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ مشاهده شده‌اند. مقایسه دو شاخص در توضیح وضعیت خشکسالی منطقه، بیانگر هم‌خوانی آن‌ها در شرایط حاد و تفاوت نسبی آن‌ها در سال‌های نرمال است زیرا شاخص SPI توصیفی محافظه‌کارانه از وضعیت خشکسالی یا ترسالی ارائه می‌دهد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق، بر افزایش دما، ناپایداری بارش و تکرار خشکسالی در منطقه مورد مطالعه دلالت دارد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۰۸

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۴/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۲۶

مقدمه

گرفته‌اند می‌توان به شاخص‌های هیدرولوژیکی SPI ، $PNPI$ ، $Elhoussaoui$ اشاره نمود (ZSI⁵ و DI ¹، EDI ²، CZI ³، $MCZI$ ⁴ (et al., 2021) که در این میان، دو شاخص $PNPI$ (Willeke et al., 1998) و SPI (Mckee et al., 1993) محاسبه، قابلیت تفسیر و عملکرد قابل اعتماد در مقیاس‌های زمانی مختلف، در مطالعات متعدد به کار رفته‌اند (Jeong et al., 2024; Mersin et al., 2022; Oubaha et al., 2024). بر اساس توصیه سازمان هواشناسی آمریکا، شاخص SPI و $PNPI$ برای ارزیابی اولیه پدیده خشکسالی هواشناسی در یک منطقه مشخص مناسب هستند (Soylu Pekpostalci et al., 2023). این دو شاخص با استفاده از داده‌های بارش در یک بازه زمانی مشخص، قادر به ارائه تحلیل خشکسالی هواشناسی (تعیین شدت و مدت خشکسالی) در مناطق با اقلیم‌های مختلف هستند (Yuce & Esit, 2021).

مطالعات متعددی در دو دهه اخیر به پایش و تحلیل خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی پرداخته‌اند و در این راستا ترکیبی از شاخص‌های متنوع و مدل‌های هوش مصنوعی را برای ارزیابی شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی استفاده نموده‌اند. کاربرد همزمان چند شاخص، دقت تحلیل‌های خشکسالی را افزایش می‌دهد و امکان شناسایی رفتارهای غیرخطی یا نامنظم در روند خشکسالی را فراهم می‌سازد (Değerli Şimşek et al., 2024; Heidarzadeh et al., 2025; Turhan, 2025). بررسی پدیده خشکسالی در حوضه رودخانه Betwa طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۴ با استفاده از شاخص‌های خشکسالی SPI ، RAI ، $PNPI$ ، DI ، $MCZI$ ، CZI و ZSI نشان داد که مناسب‌ترین شاخص برای مدیریت خشکسالی در منطقه است و بیشترین هم‌بستگی و دقت را در ارزیابی خشکسالی طی بازه‌های زمانی مختلف دارد (Singh et al., 2022).

مطالعات بر روی خشکسالی حوزه دریاچه Eğirdir در ترکیه با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی (SPI ، $PNPI$ ، RAI ⁶)، DI ، ZSI ⁷ و CZI طی سال‌های ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۲ در دو مقیاس زمانی ماهانه و سالانه، بیانگر همخوانی بالای شاخص‌های SPI و ZSI در تفسیر خشکسالی این منطقه است. همچنین

خشکسالی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین بلایای اقلیمی محسوب می‌شود که اثرات قابل توجهی بر جوامع انسانی دارد (Heydari et al., 2019; Mahmoudi et al., 2020; Alamdarloo et al., 2020). این پدیده در مقایسه با سایر مخاطرات طبیعی، بیشترین گستره زمانی و مکانی را داشته و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تأثیرات شدیدی بر منابع آب، کشاورزی و امنیت غذایی بر جای می‌گذارد (Hajarian, 2025; Kartal & Nones, 2024; Şener & Davraz, 2024). وقوع خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی طی دهه‌های اخیر در ایران موجب افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش جریان‌های سطحی و افزایش فشار بر منابع محدود آبی شده است و تداوم خشکسالی در چنین مناطقی، اثرات محیط‌زیستی گسترده و پیامدهای اقتصادی منفی زیادی را به‌همراه دارد (Habibi et al., 2021; Lotfifard et al., 2022).

خشکسالی در حالت کلی به چهار دسته خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی تقسیم‌بندی شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Miralizadeh et al., 2023). در این میان، خشکسالی هواشناسی ارتباط مستقیمی با مشخصه‌های فیزیکی مانند تغییر در مقدار بارندگی و دما دارد و به‌صورت کاهش مقدار بارش سالانه یا توزیع نامناسب آن در مقایسه با میانگین بلند مدت در یک بازه مشخص تعریف می‌شود. خشکسالی هواشناسی، هشدار برای وقوع سایر خشکسالی‌ها محسوب می‌گردد زیرا به‌طور مستقیم بر محیط زیست تأثیر می‌گذارد و در طولانی مدت سبب بروز خشکسالی کشاورزی، هیدرولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی می‌شود (Safdar et al., 2023; Choukri et al., 2023). پایش و ارزیابی دقیق خشکسالی نیازمند استفاده از شاخص‌هایی است که بتوانند ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی منطقه را به‌خوبی منعکس کنند (Mersin et al., 2022; Oubaha et al., 2024). در این راستا شاخص‌های خشکسالی هواشناسی با تکیه بر ترکیب داده‌های بسیار محدود اقلیمی و هواشناسی مانند بارش و دما، قادر به تحلیل مطلوب خشکسالی هواشناسی منطقه هستند (Choukri et al., 2023). از شاخص‌های مختلف ارزیابی خشکسالی هواشناسی که تاکنون معرفی شده و برای ارزیابی خشکسالی در مناطق مختلف جهان مورد استفاده قرار

1. Deciles Index (DI)
2. Effective Drought Index (EDI)
3. Chinese Z-Index (CZI)
4. Modified China Z-Index (MCZI)
5. Z-Score Index (ZSI)
6. Rainfall Anomaly Index (RAI)
7. Z-Score Index (ZSI)

در استان آذربایجان غربی، داده‌های بارندگی شش ایستگاه منتخب در دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹ با شاخص‌های PNPI، SPI و CZI مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج بیانگر تطابق بالای شاخص‌های SPI و CZI در تحلیل خشکسالی بودند. همچنین شاخص PNPI و SPI به ترتیب در تحلیل سال‌های نرمال و ترسالی ضعیف در استان کارایی بیشتری داشته و در مورد خشکسالی‌های ضعیف تا متوسط هر سه شاخص نتایج و کارایی تقریباً یکسانی را نشان دادند (Aligolinia et al., 2019). بررسی گسترش خشکسالی اقلیمی در کوه‌های زاگرس (حوضه بالادست دز) با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی شامل SRI⁴، SQI³، SPI، SGI⁶، SBF⁵ و SSI⁷ نشان می‌دهد که شاخص SRI توانایی بیشتری در آشکارسازی زود هنگام خشکسالی نسبت به سایر شاخص‌ها دارد. همچنین هیچ شاخصی به تنهایی قادر به پوشش کلیه ابعاد خشکسالی نیست و ترکیب شاخص‌ها ارزیابی دقیق‌تری از خشکسالی ارائه می‌کند (& Porhemmat Altafi Dadgar, 2023). خشکسالی هواشناسی حوضه زهره-جراحی در تحقیقی با استفاده از شاخص‌های SPI، PNPI، RAI و SIAP و داده‌های بارندگی شش ایستگاه باران‌سنجی موجود در این حوضه طی یک دوره آماری ۲۵ ساله مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس شاخص SPI، ایستگاه چرام با کمترین مقدار SPI و شدیدترین خشکسالی هواشناسی در دوره مورد مطالعه روبه‌رو بوده است. نتایج شاخص PNPI نیز حاکی از خشکسالی بسیار شدید در کل حوضه آبریز بود که بالاترین مقدار آن به ایستگاه فشیان تعلق داشت (Bavand et al., 2025). در تحقیقی برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی در جنوب ایران از ترکیب شاخص‌های خشکسالی SPI و SRI⁸ و شاخص کمبود توام (JDI⁹) و مدل‌های یادگیری ماشین استفاده گردید. بر اساس نتایج، تحلیل عدم قطعیت با روش UNEEC¹⁰ به افزایش اطمینان در پیش‌بینی خشکسالی‌ها کمک می‌کند. بنابراین رویکرد چند متغیره و مبتنی بر یادگیری ماشین، ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی خشکسالی و مدیریت منابع آب در مناطق خشک محسوب می‌شود

3. Streamflow Quantile Index (SQI)
4. Standardized Runoff Index (SRI)
5. Standardized Base Flow Index (SBFI)
6. Standardized Groundwater Index (SGI)
7. Standardized Soil Moisture Index (SSI)
8. The Standardized Runoff Index (SRI)
9. The Joint Deficit Index (JDI)
10. the Uncertainty Estimation based on Local Errors and Clustering (UNEEC)

دوره‌های بسیار خشک در تمامی شاخص‌ها به‌طور مشابه در سال‌های خاص شناسایی شدند و نتایج خشکسالی با کاهش سطح آب دریاچه نیز همخوانی داشت (Şener & Davraz, 2024). مطالعه بر روی داده‌های بارش ماهانه ایستگاه Niğde در ترکیه طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۰ با به‌کارگیری هفت شاخص خشکسالی (SPI، PNPI، DI، CZI، MCZI، ZSI)، روند تغییرات بلندمدت اقلیمی را در منطقه نشان می‌دهد. همچنین برای پیش‌بینی خشکسالی در دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵، از مدل شبکه عصبی غیرخطی خود بازگشتی (NARNN¹) استفاده گردید که نتایج بیانگر کارایی بالای این مدل در تحلیل سری‌های زمانی غیرخطی و کاربرد آن در برنامه‌ریزی منابع آب و مدیریت خشکسالی بود (Gümüş et al., 2025). در ایران نیز، پژوهشگران متعددی به بررسی الگوهای خشکسالی پرداخته‌اند. خشکسالی هواشناسی چهار ایستگاه مختلف در خوزستان از نظر شدت و مدت دوام، طی تحقیقی براساس شاخص‌های PNPI، SIAP² و RAI در یک دوره آماری ۳۲ ساله (۲۰۱۴-۱۹۸۳) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص PNPI فراوانی خشکسالی‌ها در آبادان بیشتر از سایر ایستگاه‌ها بوده است. همچنین بر طبق این شاخص شدیدترین خشکسالی در اهواز به وقوع پیوست و در بین سه شاخص مورد مطالعه، بیشترین تداوم خشکسالی مربوط به شاخص PNPI است (Molaei & Gravand, 2018). بررسی و تحلیل روندهای بارندگی و تأثیر آن بر شرایط خشکسالی در حوضه جازموریان با استفاده از شاخص‌های خشکسالی CZI، PNPI، DI، SPI و ZSI و داده‌های بارش ۲۴ ایستگاه اندازه‌گیری در دوره زمانی ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۳ نشان داد که شاخص‌های ZSI و PN با هم تشابه صد در صد در تشخیص دوره‌های مرطوب و خشک، شدت، دوره و تداوم دارند. شاخص‌های CZI و SPI با تشابه ۹۹/۵٪ نیز در سطح دوم تشابه قرار گرفتند. همچنین در ارزیابی شدت خشکسالی‌ها، CZI شرایط خشکسالی شدیدتری را نشان داد و مطالعه خشکسالی از طریق شاخص‌های CZI و SPI در این حوضه به‌منظور سیاست‌گذاری مناسب و مدیریت منابع آب برای حفظ و افزایش بهره‌وری از دیدگاه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی پیشنهاد گردید (Lotfinasabasl et al., 2019). در تحقیقی برای بیان کمی خشکسالی و روند آن

1. The Nonlinear Autoregressive Neural Network (NARNN)
2. Standard Index of Annual Precipitation (SIAP)

(Zamani et al., 2025).

سالانه ایستگاه سینوپتیک شهر قاین (طی دوره زمانی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۴) و شاخص‌های خشکسالی PNPI و SPI، به ارزیابی پدیده خشکسالی هواشناسی در سطح شهر قاین پرداخته شد تا ضمن مقایسه نتایج آن‌ها، الگوی حاکم بر پدیده خشکسالی از نظر شدت و مدت در طی ۴ دهه اخیر مورد بررسی قرار گیرد و زمینه‌ساز مدیریت صحیح منابع آب و کاهش آسیب‌پذیری در رویارویی با بحران آب در سطح شهر قاین باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شهر قاین واقع در استان خراسان جنوبی بوده که با جمعیتی بالغ بر ۴۲۳۲۳ نفر (Anonymous, 2016) مرکز شهرستان قائنات است. شهر قاین با متوسط ارتفاع ۱۴۳۲ m از سطح دریا، با بارندگی سالانه ۱۶۱/۳۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۴/۹ درجه سانتی‌گراد، بر اساس شاخص دومارتن (Zareiee, 2014)، دارای اقلیمی خشک^۱ و بر اساس طبقه‌بندی کوپن^۲ (Kalvová et al., 2003; Chen & Chen, 2013)، اقلیم نیمه خشک سرد^۳ بوده و مقدار متوسط رطوبت نسبی سالانه ۳۸٪، سرعت متوسط باد ۵/۲ m/s و جهت باد غالب، از سمت شمال شرقی است (Anonymous, 2024).

دشت قاین با قرارگیری در حاشیه فلات مرکزی ایران، از نظر توپوگرافی ترکیبی از دشت‌های آبرفتی و ارتفاعات پراکنده کوهستانی است. این موقعیت سبب تمرکز بخش عمده سکونتگاه‌های شهری و فعالیت‌های کشاورزی شده است. کاربری اراضی شهرستان قائنات اغلب شامل اراضی کشاورزی (زراعت آبی و دیم، باغات زرشک و زعفران)، مراتع نیمه‌خشک، و پهنه‌های مسکونی شهری و روستایی است. توسعه کالبدی شهر قاین طی دو دهه اخیر موجب کاهش سطح اراضی کشاورزی مرغوب در حاشیه شهر شده و تغییر الگوی کاربری به سمت اراضی مسکونی و خدماتی را به دنبال داشته است. از نظر منابع آبی، منطقه با محدودیت جدی مواجه بوده و تأمین آب اغلب بر پایه بهره‌برداری از سفره‌های زیرزمینی از طریق قنات‌ها، چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق قرار دارد. کاهش بارندگی‌های سالانه و برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی، افت

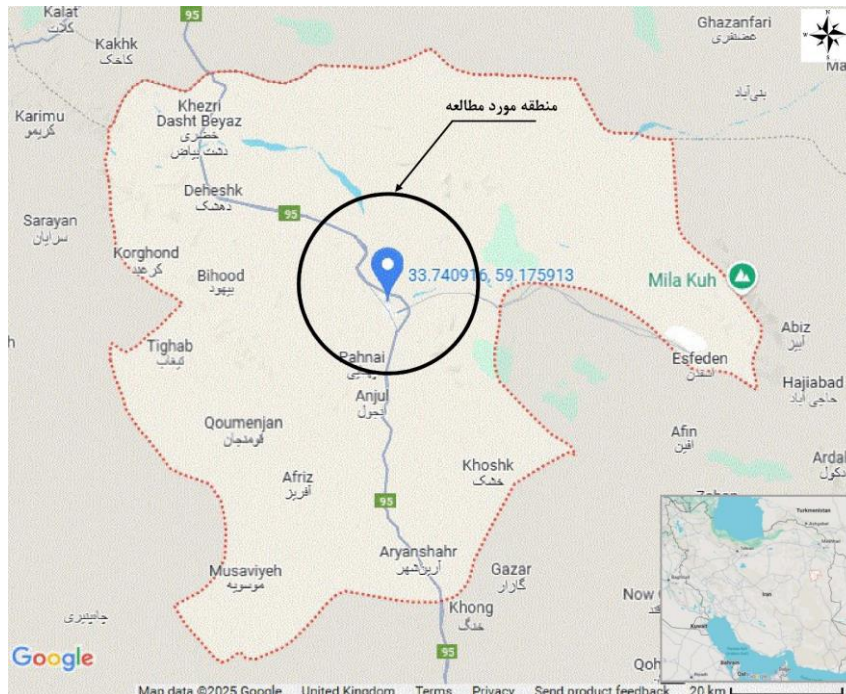
به‌طور کلی بر اساس مطالعات فوق، انتخاب شاخص مناسب برای ارزیابی خشکسالی باید متناسب با ویژگی‌های اقلیمی و مقیاس مطالعاتی صورت گیرد و استفاده هم‌زمان از شاخص‌های ساده و پیچیده و توجه به شرایط اقلیمی و منابع داده، درک جامع‌تری از رفتار خشکسالی برای به‌کارگیری راهکارهای مؤثر در مدیریت آن ارائه می‌دهد. همچنین با وجود مطالعات گسترده در زمینه تحلیل خشکسالی در ایران، تعداد محدودی از آن‌ها به تلفیق شاخص‌های ساده‌ای مانند PNPI و SPI در مقیاس‌های منطقه‌ای پرداخته‌اند.

شهر قاین به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، از نواحی خشک و کم‌بارش شرق ایران محسوب می‌شود که دارای محدودیت زیادی در زمینه دسترسی به منابع آب با کیفیت مطلوب برای مصارف بخش‌های خانگی، کشاورزی و صنعتی است و بخش قابل توجهی از این منابع نیز صرف فعالیت‌های کشاورزی با الگوی آبیاری سنتی می‌شود. سوء مدیریت و برداشت بی‌رویه از منابع آب دشت قاین طی دهه‌های اخیر، حفر چاه‌های غیر مجاز و نوسانات شدید مقدار بارندگی سالانه در طی دو دهه گذشته، زمینه تشدید تنش آبی در منطقه و کاهش کیفی آب را فراهم نموده است. به‌طوری‌که در حال حاضر، برخی از چاه‌های آب در سطح دشت قاین به‌طور کامل خشک گردیده و سایر چاه‌های کشاورزی و شرب برای تأمین نیاز آبی در طی خشکسالی‌های اخیر با حداکثر ظرفیت آبدهی بهره‌برداری می‌شوند. همچنین اولین دوره قطعی آب بخش خانگی (ناشی از کمبود منابع آب) در خردادماه ۱۴۰۴ در مناطقی از شهر قاین گزارش گردید که با حفر چاه‌های جدید (و اما با کیفیت آب پایین)، این مشکل به‌طور موقت مرتفع شد. این مسئله ضمن هشدار و اعلام زنگ خطر برای مدیران صنعت آب منطقه، اهمیت شناخت پدیده خشکسالی هواشناسی و الگوی حاکم بر آن (شدت و مدت خشکسالی) را در مدیریت بحران این پدیده و کنترل اثرات سوء ناشی از آن در سطح شهر قاین روشن می‌سازد. علی‌رغم این مسئله، ارزیابی جامع و بلندمدتی در زمینه تحلیل روند خشکسالی در منطقه با رویکرد آماری و استفاده هم‌زمان از شاخص‌های خشکسالی انجام نشده است. لذا این تحقیق با هدف مطالعه موردی خشکسالی هواشناسی شهر قاین در طولانی‌ترین بازه آماری موجود دما و بارش انجام گردید. بدین منظور با استفاده از آمار بارندگی و دمای متوسط

1. Arid Climate
2. Köppen Climate Classification
3. Steppe (semi-arid): BSk

شکل ۱ موقعیت شهرستان قائنات، منطقه مورد مطالعه و ایستگاه هواشناسی شهر قاین را نشان می‌دهد.

سطح آب و بروز پدیده فرونشست را در دشت قاین به دنبال داشته و در حال حاضر، مدیریت پایدار منابع آب به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین چالش‌های توسعه شهری و کشاورزی منطقه مطرح است (Foruzanmehr & Khozaymehnezhad, 2023;)



شکل ۱. موقعیت شهرستان قائنات، منطقه مورد مطالعه و ایستگاه هواشناسی شهر قاین

Fig 1. Geographic location of Qaenat city, the study area and the Qaen synoptic meteorological station

شهر قاین مورد استفاده قرار گرفت. PNPI یکی از شاخص‌های ساده و رایج برای ارزیابی شرایط ترسالی یا خشکسالی بر پایه مقادیر بارندگی است. این شاخص از نسبت بارندگی ثبت شده در یک دوره زمانی مشخص (مانند ماهانه، فصلی یا سالانه) به میانگین بلندمدت همان دوره به دست می‌آید و شرایط بارندگی دوره مورد نظر را نسبت به شرایط نرمال نشان می‌دهد. مقدار PNPI بر حسب رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$PNPI = \left(\frac{P_i}{\bar{P}} \right) * 100 \quad (1)$$

که در این رابطه:

P_i : مقدار بارندگی در سالی مشخص از یک بازه زمانی، \bar{P} : میانگین بلند مدت بارندگی در بازه زمانی مذکور است (Willeke et al., 1998). محاسبات مربوط به شاخص PNPI در محیط نرم‌افزار Microsoft Excel 2016 انجام گردید. شاخص بارش استاندارد شده (SPI) یکی از روش‌های دقیق برای ارزیابی شدت و تداوم خشکسالی‌های هواشناسی برای بازه‌های زمانی مختلف (۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) است و می‌تواند

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، داده‌های بارندگی سالانه ایستگاه هواشناسی سینوپتیک قاین در دوره آماری ۳۷ ساله (سال آبی ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۴) از سازمان هواشناسی استان خراسان جنوبی دریافت گردید. ایستگاه سینوپتیک شهر قاین در «۳۳° ۱۰' ۵۹" طول جغرافیایی شرقی و ۳۳° ۴۴' ۲۴" عرض جغرافیایی شمالی و ارتفاع ۱۴۳۲ متر از سطح دریا قرار گرفته است و دقیق‌ترین اطلاعات هواشناسی را در سطح شهرستان قائنات دارد. پیش از تحلیل داده‌ها، نرمال بودن آن‌ها (با آزمون رایان-جوینر) در محیط نرم‌افزار Minitab 16 و امکان وجود داده‌های پرت (با روش IQR^2) در محیط نرم‌افزار Microsoft Excel 2016 مورد بررسی قرار گرفت.

شاخص‌های ارزیابی خشکسالی

دو شاخص PNPI و SPI برای پایش خشکسالی هواشناسی

1. Ryan-Joiner Normality Test
2. Interquartile Range

که در این رابطه:
 P_i : مقدار بارش در سالی مشخص از یک بازه زمانی، \bar{P} : میانگین بلند مدت بارش و S : انحراف معیار مقادیر بارش در دوره مورد نظر است (McKee et al., 1993). محاسبات مربوط به شاخص‌های SPI در محیط نرم‌افزار DrinC^۱ (Version 1.7) و با استفاده از توزیع گاما انجام گردید. جدول ۱ نحوه طبقه‌بندی خشکسالی را بر اساس PNPI و SPI ارائه می‌کند.

خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت را شناسایی نماید. این شاخص با استفاده از داده‌های بارش محاسبه می‌شود و از طریق مقایسه بارش ثبت‌شده با میانگین بلندمدت آن، ناهنجاری‌ها را مشخص می‌کند. سپس SPI به کمک توزیع گامبل یا گاما داده‌های بارندگی را به توزیع نرمال تبدیل کرده و بر اساس مقادیر استاندارد شده، وضعیت خشکسالی مشخص می‌گردد. مقادیر SPI با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$SPI = \left(\frac{P_i - \bar{P}}{S} \right) \quad (2)$$

جدول ۱. طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس SPI و PNPI (Korkmaz & Kuriqi, 2024)

Table 1. Classification of drought severity based on the PNPI and SPI

بندی خشکسالی طبقه Drought class	بارش استاندارد شده SPI	درصد نرمال بارش PNPI
ترسالی بسیار شدید Extremely wet	≥ 2	≥ 110
ترسالی شدید Very wet	1.5-1.99	--
ترسالی متوسط Moderately wet	1.0-1.49	--
وضعیت نرمال Normal	0.99 to -0.99	80-110
خشکسالی متوسط Moderately dry	-1 to -1.49	55-80
خشکسالی شدید Severely dry	-1.5 to -1.99	40-55
خشکسالی بسیار شدید Extremely dry	≤ -2	$40 \geq$

نظر گرفته شد. کلیه پارامترها بر اساس تنظیمات پیش فرض افزونه‌ها اجرا گردید و سطح معناداری روی ۰,۰۵ تنظیم شد. در روش من-کندال فرض صفر آزمون (H_0)، بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها و پذیرش فرض یک (H_1) بر وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد. در این روش ابتدا اختلاف بین هر یک از مشاهده‌ها با کلیه مشاهده‌های پس از آن، محاسبه شده و پارامتر S به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (3)$$

که در این رابطه:
 n طول بازه زمانی داده‌ها، x_i و x_j دو مقدار داده متوالی سری هستند و تابع $\text{Sign}(x_i - x_j)$ به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

تحلیل روند^۲ داده‌های بارندگی و دما

در بررسی روند تغییرات بارندگی سالانه و میانگین دمای سالیانه در ایستگاه سینوپتیک قاین از تحلیل رگرسیون (خطی ساده^۳ و غیر خطی) و آزمون‌های غیر پارامتریک من-کندال^۴ (Kendall, 1975; Mann, 1945) و شیب‌سن^۵ در محیط نرم‌افزار Microsoft Excel 2016 استفاده گردید که انجام آزمون‌های من-کندال و شیب‌سن با قابلیت افزونه‌های^۶ این نرم‌افزار میسر شد. قابلیت اعتماد روش رگرسیون با استفاده از ضریب تعیین مشخص گردید. سطح اطمینان آزمون‌های من-کندال و شیب‌سن ۹۵ درصد ($\alpha=0.05$) در

1. DrinC (Drought Indices Calculator) software- <https://drought-software.com>.
2. Trend Analysis
3. Simple Linear Regression
4. Non-parametric Mann-Kendall
5. Sen's Slope
6. Extension

مورد مطالعه، با بررسی شاخص‌های آماری پایه شامل میانگین^۱، انحراف معیار^۲، ضریب تغییرات^۳، کشیدگی^۴ و چولگی^۵ محاسبه گردید. جدول ۳ شاخص‌های آماری بارش سالانه را در ایستگاه سینوپتیک قاین طی بازه زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

منطقه مورد مطالعه با میانگین بارندگی سالیانه ۱۶۱/۳۰ میلی‌متر (بارندگی غالب در طی دوره سرد سال)، دمای متوسط سالیانه ۱۴/۹۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط دمای سردترین ماه سال ۲/۶۰ درجه سانتی‌گراد در طی دوره آماری، اقلیمی نیمه خشک سرد بر اساس طبقه بندی اقلیمی کوپن دارد (Cui et al., 2021). انحراف معیار و ضریب تغییرات بالای آمار بارندگی سالیانه (SD=59.95 و CV=0.37)، نوسانات قابل توجه در میزان بارش سالانه (توزیع بارش سالانه ناپایدار) و تغییرپذیری شدید آن را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین، مقدار چولگی مثبت توزیع داده‌های بارندگی (۰/۶۴) بیانگر وجود تعدادی از سال‌ها با بارش بسیار بالا بوده که موجب کشیدگی توزیع به سمت راست شده است. بیشترین و کمترین میزان بارندگی سالانه نیز در طول دوره آماری مربوط به سال‌های آبی ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به ترتیب با مقادیر ۳۰۶/۳۸ و ۵۹/۸۹ میلی‌متر گزارش شده و این اختلاف شدید (بیش از ۵ برابر) بین بیشینه و کمینه بارندگی سالیانه، گویای احتمال وقوع سال‌های بسیار خشک یا بسیار پربارش در منطقه مورد مطالعه است.

نتایج و بحث

بررسی توزیع داده‌های بارندگی سالیانه و امکان وجود داده‌های پرت

امکان تبعیت داده‌های بارندگی سالیانه از توزیع نرمال با استفاده از آزمون رایان-جوینر در محیط نرم‌افزار Minitab ۱۶ مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس شکل ۲، داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند و همچنین مقدار RJ بسیار بالا و نزدیک به ۱ (برابر با ۰/۹۷۳) مؤید تطابق مطلوب داده‌ها با توزیع نرمال است. شکل ۲ برازش توزیع نرمال بر داده‌های بارندگی سالیانه ایستگاه سینوپتیک قاین را نشان می‌دهد.

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0, & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1, & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (۴)$$

سپس مقدار واریانس S توسط رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{n} [n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)]$$

که در این رابطه: n تعداد گروه‌های تساوی در داده‌هاست و t تعداد اعضا هر گروه از داده‌های مساوی را نشان می‌دهد. مقدار آماره Z نیز برای آزمون از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ -1, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (۶)$$

فرض صفر (H_0) هنگامی پذیرفته است که یک مجموعه داده با n متغیر مستقل و دارای توزیع تصادفی، دارای هیچ روندی نباشند و ترتیب آن‌ها به صورت مساوی محتمل باشد. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی در نظر گرفته می‌شود. در روش شیب‌سن، بزرگی (شیب) یک سری زمانی با یک روش ساده ناپارامتریک (توسعه یافته توسط سن در سال ۱۹۶۸)، ارزیابی می‌گردد. مقدار شیب با رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad j > i \quad (۷)$$

در این رابطه: β شیب رابطه شیب‌سن بوده و مقدار مثبت و منفی آن به ترتیب بیانگر روند صعودی و نزولی در سری داده‌ها است (Menna et al., 2022).

همچنین، هم‌پوشانی و رابطه بین شاخص‌های SPI و PNPI با استفاده از ضریب هم‌بستگی پیرسون تحلیل گردید. کلیه محاسبات آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای Minitab 16 و Microsoft Excel 2016 انجام شد. جدول ۲ آمار بارندگی و دمای میانگین سالانه ایستگاه سینوپتیک قاین را ارائه می‌کند.

تحلیل آماری بارش سالیانه

مقدار بارش سالیانه مهم‌ترین پارامتر در ارزیابی خشکسالی هواشناسی با استفاده از دو شاخص PNPI و SPI محسوب می‌شود. بنابراین ویژگی‌های آماری بارش سالیانه در ایستگاه

1. Average
2. Standard Deviation (SD)
3. Coefficient Variation (CV)
4. Kurtosis
5. Skewness

جدول ۲. آمار بارندگی و دمای میانگین سالانه ایستگاه سینوپتیک قاین

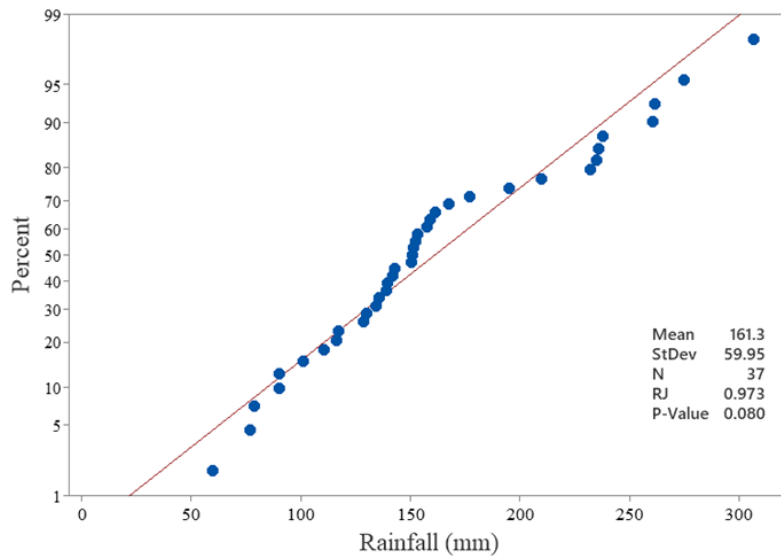
Table 2. Annual precipitation and mean annual temperature statistics of the Qaen synoptic station

سال آبی Water Year	بارندگی (mm) Precipitation (mm)	دما (°C) Temperature (°C)
1988	177.13	14.36
1989	130.23	13.26
1990	195.3	14.04
1991	261.6	12.33
1992	238.6	12.20
1993	235.02	13.27
1994	116.4	13.94
1995	161.42	14.40
1996	274.93	13.80
1997	151.68	14.11
1998	260.67	14.45
1999	235.74	15.32
2000	77.28	14.81
2001	90.43	15.02
2002	152.51	15.80
2003	150.81	14.91
2004	101.23	14.76
2005	232.23	14.53
2006	90.37	15.39
2007	135.74	14.30
2008	79.01	14.57
2009	139.81	15.10
2010	151.03	16.21
2011	142.85	15.53
2012	157.88	14.47
2013	128.76	15.54
2014	117.35	14.92
2015	153.25	16.01
2016	110.68	16.30
2017	158.99	15.95
2018	134.45	15.76
2019	209.64	15.65
2020	306.38	14.60
2021	59.89	16.14
2022	139.13	16.58
2023	167.73	16.40
2024	142.26	16.63

جدول ۳. شاخص‌های آماری بارش سالانه در ایستگاه سینوپتیک قاین طی بازه زمانی مورد مطالعه

Table 3. Statistical indices of annual precipitation at the Qaen synoptic station during the study period

ایستگاه سینوپتیک Synoptic station	قاین Qaen
میانگین Average	161.30
انحراف معیار Standard Deviation (SD)	59.95
ضریب تغییرات Coefficient Variation (CV)	0.37
کشیدگی Kurtosis	-0.17
چولگی Skewness	0.64



شکل ۲. برازش توزیع نرمال بر داده‌های بارندگی سالیانه ایستگاه سینوپتیک قاین

Fig 2. Normal distribution fitting to the annual precipitation data of the Qaen synoptic station

۱۶/۶۳ درجه سانتی‌گراد) و سال آبی ۱۹۹۲ (با مقدار ۱۲/۲۰ درجه سانتی‌گراد) مشاهده می‌شود.

بررسی نرمال بودن توزیع مقادیر دمای میانگین سالیانه شهر قاین، با آزمون رایان-جوینر در محیط نرم‌افزار Minitab 16 انجام گردید. مقدار RJ برابر با ۰/۹۸۹، در کنار مقدار p-value بزرگ‌تر از ۰/۱، نشان‌دهنده عدم وجود انحراف معنادار داده‌ها از توزیع نرمال است و فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها در سطح اطمینان بالا پذیرفته می‌شود. شکل ۳ برازش توزیع نرمال بر داده‌های دمای میانگین سالیانه ایستگاه سینوپتیک قاین را نشان می‌دهد.

تحلیل روند تغییرات بارندگی و دما در طول دوره آماری

در این بخش تغییرات بلندمدت در داده‌های بارندگی سالیانه و میانگین دمای سالیانه ایستگاه مورد مطالعه طی بازه زمانی سال‌های آبی ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۴ با استفاده از روش رگرسیون خطی، آزمون من-کندال و شیب‌سن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

روند تغییرات بارندگی سالیانه

نمودار تغییرات بارندگی سالیانه بیانگر نوسانات قابل توجه در میزان بارندگی طی طول دوره مورد مطالعه بوده است. در بین مدل‌های مختلف خطی و غیرخطی قابل برازش بر داده‌های بارش سالیانه، مقدار ضریب تعیین همواره پایین‌تر از ۰/۱ بوده و بیانگر عدم تبعیت داده‌های بارش سالیانه از الگوی خاصی است. به‌طور مثال در برازش خطی، مقدار شیب

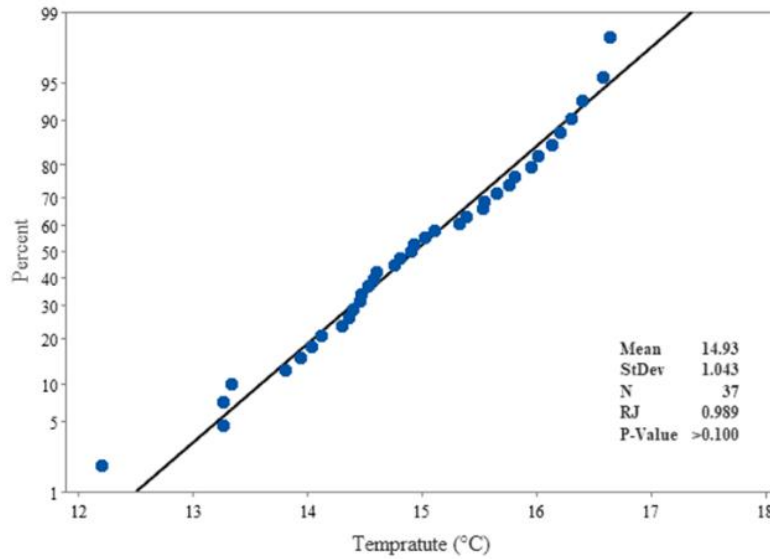
شناسایی داده‌های پرت با استفاده از آزمون^۱ IQR (فاصله بین چارک‌ها) توسط نرم‌افزار Microsoft Excel 2016 انجام شد و بر این اساس مقادیر حد بالا و پایین بارندگی سالیانه به ترتیب برابر ۲۸/۹۴ و ۲۹۵/۱۴ میلی‌متر تعیین گردید که بیانگر تغییرات قابل توجه در میزان بارش طی سال‌های مختلف است. به‌طور کلی بارندگی این منطقه در بیشتر سال‌ها در محدوده‌ای نسبتاً ثابت قرار دارد اما بارندگی سال آبی ۲۰۲۰ با مقدار ۳۰۶/۳۸ میلی‌متر به‌طور چشمگیری از سایر سال‌ها بالاتر است و ابتدا بر اساس این آزمون به‌عنوان یک داده پرت شناسایی گردید. اما بررسی شرایط اقلیمی و جوی آن سال، این میزان بارش را به پدیده‌های خاص جوی نسبت داده و یک بارش با دوره بازگشت بالا محسوب نمود.

ارزیابی توزیع داده‌ها، امکان وجود داده‌های پرت و

تحلیل آماری دمای متوسط سالیانه

داده‌های میانگین دمای سالیانه ایستگاه سینوپتیک شهر قاین با استفاده از آزمون IQR برای شناسایی داده‌های پرت مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، دمای بیشتر سال‌ها در بازه‌ای نسبتاً یکنواخت و پایدار قرار دارد و داده‌ی پرت مشاهده نمی‌شود. همچنین تحلیل آماری تغییرات دمایی در این ایستگاه، بیانگر میانگین دمای سالیانه، ۱۴/۹۳ درجه سانتی‌گراد و پراکندگی نسبتاً پایین داده‌ها حول میانگین (SD=1/043) است. بیشترین و کمترین دمای سالیانه در طول دوره آماری به ترتیب در سال آبی ۲۰۲۴ (با مقدار

1. Interquartile Range

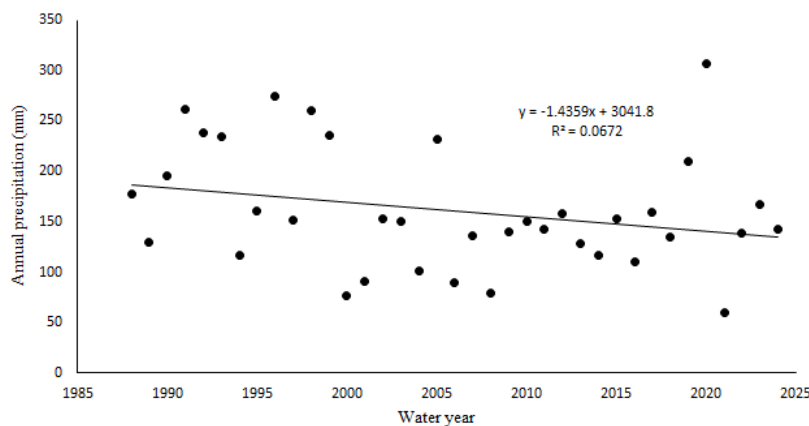


شکل ۳. برازش توزیع نرمال بر داده‌های دمای میانگین سالیانه ایستگاه سینوپتیک قاین

Fig 3. Normal distribution fitting to the average annual temperature data of the Qaen synoptic station

نسبی در بارندگی منطقه، نمی‌توان با اطمینان آماری آن را به‌عنوان یک روند قطعی در نظر گرفت. شکل ۴ برازش خطی بر آمار بارندگی سالیانه در ایستگاه سینوپتیک قاین را نشان می‌دهد.

خط رگرسیون برای بارندگی برابر با $-1/44$ میلی‌متر در سال به‌دست آمد که روندی کاهشی در بارش سالیانه را نشان می‌دهد. اما مقدار ضریب تعیین بسیار پایین ($R^2=0.0672/0$) و سطح معنی‌داری آزمون (p-value= $12/0$) حاکی از عدم معناداری آماری این روند است. لذا علی‌رغم مشاهده کاهش



شکل ۴. برازش خطی بر آمار بارندگی سالیانه ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه

Fig 4. Linear trend fitting to the annual precipitation data of the Qaen synoptic station during the studied period

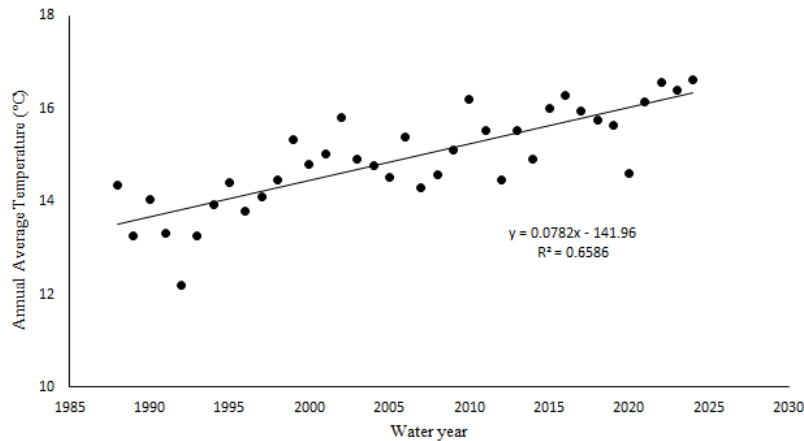
جزئی در بارندگی را نشان می‌دهد اما چون بازه اطمینان 95% (از $-2/931$ تا $0/057$) شامل صفر می‌شود و این کاهش از نظر آماری معنادار نیست. بنابراین بر اساس نتایج فوق، تغییرات بارندگی طی دوره مورد مطالعه فاقد روندی معنادار بوده است.

نتایج آزمون من-کندال برای بررسی روند تغییرات بارندگی، با محاسبه مقدار آماره Z برابر با $-1/37$ ، حاکی از روند نزولی در بارندگی بود. اما مقدار p-value برابر $0/169$ (بیشتر از سطح معنی‌داری $0/05$) نشان می‌دهد که این روند در سطح اطمینان 95% از نظر آماری معنادار نیست. همچنین، مقدار شیب‌سن برابر با $-1/563$ برآورد شد که یک روند کاهشی

روند تغییرات دمای میانگین سالیانه

در تحلیل روند دمای میانگین سالیانه، از بین انواع مختلف برازش خطی و غیر خطی، بهترین مدل برازش مربوط به مدل رگرسیون خطی بود و شیب خط رگرسیون برابر با $+0/078$ محاسبه گردید که مقادیر بالای ضریب تعیین ($R^2=0/66$)

و $p\text{-value} = 10 \times 62/6 = p\text{-value}$ بیانگر معناداری در سطح اطمینان ۹۹٪، روند افزایش دما در این ایستگاه را به صورت قطعی و معنادار آماری تأیید می‌کند. شکل ۵ برازش خطی بر آمار دمای متوسط سالیانه در ایستگاه سینوپتیک قاین را نشان می‌دهد.



شکل ۵. برازش خطی بر آمار دمای متوسط سالیانه ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه

Fig 5. Linear trend fitting to the average annual temperature data of the Qaen synoptic station during the studied period

تحلیل خشکسالی هواشناسی با شاخص PNPI
 یکی از شاخص‌های ساده و قابل فهم در تحلیل خشکسالی است که از مقایسه بارندگی سالانه در یک سال مشخص با میانگین درازمدت بارندگی منطقه محاسبه می‌شود. برای ایستگاه مورد مطالعه، میانگین بارندگی سالیانه در بازه ۳۷ ساله (از سال آبی ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۴) برابر با $۱۶۱/۳۰$ میلی‌متر محاسبه گردید. تحلیل سیر زمانی بارندگی‌ها بر اساس مقادیر محاسبه شده توسط PNPI نشان می‌دهد که دوره‌های ترسالی شدید عمدتاً در فاصله سال‌های آبی ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹ و همچنین در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ رخ داده‌اند. این سال‌ها با درصد نرمال بارندگی بیش از ۱۱۰٪ میانگین بلندمدت (در برخی موارد تا بیش از ۱۸۰٪)، معرف ترسالی‌های بسیار شدید بوده‌اند. از سوی دیگر، بر اساس شکل ۶، از نظر زمانی بسیاری از سال‌های خشک منطقه در نیمه دوم بازه آماری (به‌ویژه پس از سال ۱۹۹۹) متمرکز هستند. به‌طور کلی الگوی بارش در سال‌های آبی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ و همچنین ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ نشان‌دهنده تسلط دوره‌های خشکسالی با شدت متوسط تا بسیار شدید بوده و در برخی سال‌ها بارندگی به کمتر از ۵۰٪ نرمال کاهش

همچنین بر اساس نتایج آزمون‌های من-کندال و شیب سن، روند افزایش دمای میانگین سالیانه از نظر آماری معنادار است. مقدار آماره‌ی اصلی^۱ و نرمال شده^۲ من-کندال به ترتیب برابر ۴۰۶ و $۵/۳۰$ به دست آمد که با مقدار p بسیار کوچک‌تر از $0/05$ ($p\text{-value}=18/1 \times 10^{-7}$) نشان‌دهنده‌ی وجود یک روند افزایشی معنادار در دمای میانگین سالیانه است. روش شیب‌سن نیز مقداری برابر با $0/080$ محاسبه نمود که بازه اطمینان ۹۵٪ آن بین $0/0592$ تا $0/991$ قرار دارد. این نتایج بیانگر افزایش دمای میانگین سالیانه طی دوره مورد مطالعه است که این افزایش دما می‌تواند به‌طور مستقیم بر تشدید پدیده خشکسالی از طریق افزایش تبخیر و کاهش رطوبت خاک تأثیرگذار باشد.

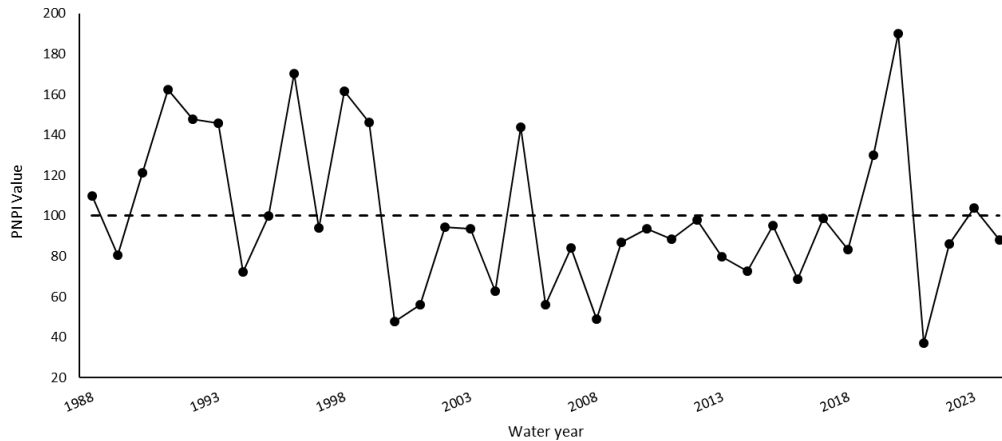
تحلیل خشکسالی هواشناسی منطقه

در این پژوهش، به‌منظور بررسی رفتار اقلیمی و تحلیل خشکسالی بلندمدت شهر قاین، از شاخص‌های PNPI و SPI استفاده شد.

1. MK-stat (S)
2. Z-statistic

خشکسالی را طی بازه مورد مطالعه تجربه نموده است. شکل ۶ تغییرات مقادیر PNPI را برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

یافته است. در این بین، سال‌های آبی ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ به ترتیب با مقادیر PNPI برابر ۵۶/۰۳، ۴۸/۹۸، ۶۸/۶۲ و ۳۷/۱۳ از خشک‌ترین سال‌ها و سال آبی ۲۰۲۱ شدیدترین



شکل ۶. تغییرات مقادیر PNPI برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه

Fig 6. Variations in PNPI values for the Qaen synoptic station during the studied period

بسیار شدید طبقه‌بندی شده‌اند. جدول ۴ نتایج طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی هواشناسی ایستگاه سینوپتیک قاین را بر اساس PNPI در دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد.

همچنین با دسته‌بندی سال‌ها بر اساس شدت خشکسالی و ترسالی، بیش از ۴۱٪ کل سال‌های دوره مورد مطالعه در یکی از طبقه‌های خشکسالی (متوسط، شدید یا بسیار شدید) قرار دارند، در حالی که فقط حدود ۳۰٪ از سال‌ها به‌عنوان ترسالی

جدول ۳. طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی هواشناسی ایستگاه سینوپتیک قاین بر اساس PNPI

Table 3. Classification of meteorological drought conditions at the Qaen synoptic station based on the PNPI

ایستگاه سینوپتیک Synoptic station	قاین Qaen
میانگین Average	161.30
انحراف معیار Standard Deviation (SD)	59.95
ضریب تغییرات Coefficient Variation (CV)	0.37
کشیدگی Kurtosis	-0.17
چولگی Skewness	0.64

کم‌بارشی‌های متوالی نداشتند و الگوی غالب خشکسالی همچنان پابرجا باقی ماند. این نوسانات شدید از ترسالی به خشکسالی، چالش‌های متعددی را برای برنامه‌ریزی منابع آبی و کشاورزی منطقه ایجاد می‌کند. همچنین در حالی که دوره‌های ترسالی بیشتر به‌صورت مقطعی و گسسته ظاهر شده‌اند، خشکسالی‌ها تمایل به تکرار متوالی و دوره‌ای از خود نشان داده‌اند. این نسبت قابل توجه از خشکسالی‌ها، بیانگر

به‌طور کلی بررسی توزیع زمانی نشان می‌دهد که پس از یک دوره نسبتاً پربارش در دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ میلادی، در اوایل دهه ۲۰۰۰ منطقه وارد مرحله خشکسالی مزمز شده و این روند تاکنون با شدت‌های متغیر ادامه داشته است. تنها استثنای قابل توجه، سه سال آبی ۲۰۰۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ هستند که به‌طور ناگهانی بارندگی بسیار بالا در این سه سال ثبت شده است. اما این ترسالی‌ها تأثیر پایداری بر جبران

اساس شاخص SPI نشان داد که بیشترین فراوانی ($62/16$) مربوط به وضعیت نرمال SPI (بین -۱ تا +۱) بوده و در مقابل ۶ سال از دوره آماری در محدوده‌های مختلف خشکسالی قرار گرفتند که شامل ۳ سال خشکسالی متوسط، ۲ سال خشکسالی شدید و ۱ سال (سال آبی ۲۰۲۱) خشکسالی بسیار شدید بوده است. از سوی دیگر، ۸ سال دارای شاخص SPI بیش از ۱ بود که نشان‌دهنده ترسالی متوسط تا شدید است و در این میان، سال آبی ۲۰۲۰، با مقدار $2/08$ به‌عنوان ترسالی بسیار شدید طبقه‌بندی می‌شود. این نوسانات شدید در بازه زمانی کوتاه، نظیر تغییر ناگهانی از ترسالی بسیار شدید در سال ۲۰۲۰ به خشکسالی شدید در سال ۲۰۲۱، حاکی از تغییرات اقلیمی پر نوسان در منطقه مورد مطالعه است. جدول ۵ نتایج طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی هواشناسی ایستگاه سینوپتیک قاین را بر اساس SPI در دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۴. طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی هواشناسی ایستگاه سینوپتیک قاین بر اساس SPI

Table 4. Classification of meteorological drought conditions at the Qaen synoptic station based on the SPI

وضعیت خشکسالی Condition	تعداد سال Number of years	درصد Percentage
ترسالی بسیار شدید Extremely wet	11	29.73%
وضعیت نرمال Normal	11	29.73%
خشکسالی متوسط Moderately dry	6	16.22%
خشکسالی شدید Severely dry	5	13.51%
خشکسالی بسیار شدید Extremely dry	4	10.81%

ظاهر شده‌اند (سال‌های آبی ۲۰۰۰ با $SPI=67/1$ و ۲۰۰۸ با $SPI=62/1$). بیشترین تغییرات ناگهانی مقدار SPI در یک سال نیز مربوط به گذار از ترسالی بسیار شدید سال ۲۰۲۰ ($SPI=08/2$) به خشکسالی بسیار شدید در سال ۲۰۲۱ ($SPI=20/2$) و معادل کاهش $4/28$ واحدی در این شاخص طی یک سال است. این رفتار نوسانی و شدید اقلیم منطقه، نشانه‌ای از افزایش تغییرپذیری سالانه و احتمال اثرات تغییر اقلیم است. به‌طور کلی نوسانات شدید SPI-12 در این منطقه بیانگر وجود خشکسالی‌های دوره‌ای و در برخی موارد شدید

غلبه اقلیم خشک در بلندمدت است که می‌تواند تبعات زیادی برای منابع آب، کشاورزی و پوشش گیاهی به‌همراه داشته باشد و نیازمند برنامه‌ریزی برای ذخیره‌سازی آب، بازنگری در الگوی کشت، و افزایش بهره‌وری منابع آبی است.

تحلیل خشکسالی هواشناسی با شاخص SPI

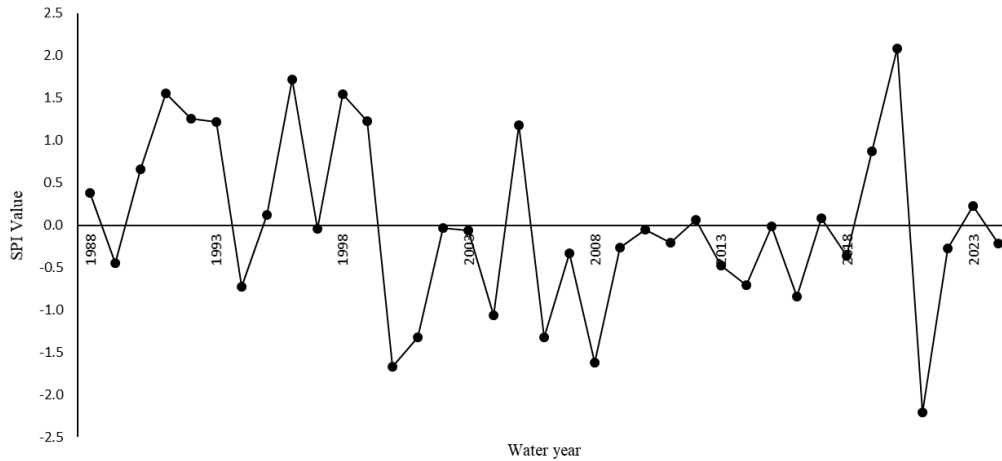
بررسی نوسانات بارندگی و شناسایی دوره‌های خشکسالی و ترسالی در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهر قاین طی دوره مورد مطالعه با استفاده از روش SPI سالانه و فصلی ($SPI-12$, $SPI-6$, $SPI-3$) انجام گرفت. این شاخص مبتنی بر محاسبه انحراف نرمال شده بارندگی هر سال نسبت به میانگین و انحراف معیار بلندمدت است و امکان مقایسه شرایط مختلف رطوبتی را در طول زمان فراهم می‌سازد.

بر اساس نتایج، مقادیر SPI-12 در این بازه زمانی از مقدار حداقل $2/2$ - (سال آبی ۲۰۲۱) تا حداکثر $2/08$ (سال آبی ۲۰۲۰) در نوسان بوده است. تحلیل طبقه‌بندی سال‌ها بر

در بررسی تغییرات شدت و توالی زمانی خشکسالی‌ها بر اساس شاخص SPI، نوسانات قابل توجهی در فواصل بین رخداد‌های خشکسالی مشاهده می‌شود (شکل ۷). یکی از طولانی‌ترین دوره‌های بدون خشکسالی بین سال‌های آبی ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۹ رخ داده که طی آن شاخص SPI همواره در محدوده نرمال تا ترسالی قرار داشته و هیچ سالی با SPI کمتر از -۱ ثبت نشده است. در مقابل، بازه زمانی سال‌های آبی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ دارای بیشترین تراکم خشکسالی‌های پیاپی بوده که در آن چندین سال با شدت خشکسالی شدید

۷ تغییرات مقادیر SPI-12 را برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

است که با توجه به فراوانی دوره‌های خشک و روند افزایشی دما، می‌توان نتیجه گرفت که منطقه مورد مطالعه با خطر بالای خشکسالی در سال‌های آینده روبه‌رو خواهد بود. شکل



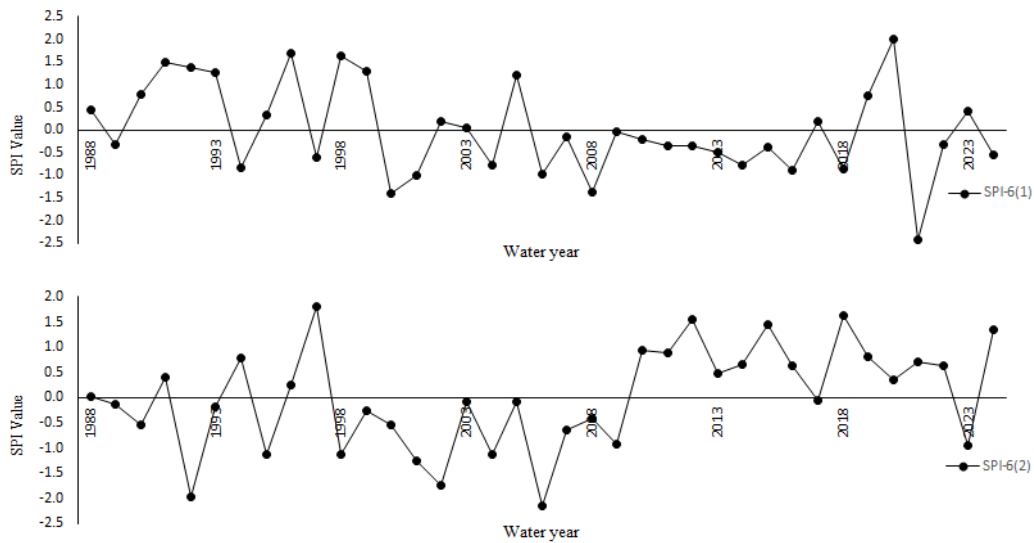
شکل ۷. تغییرات مقادیر SPI-12 برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه

Fig 7. Variations in SPI-12 values for the Qaen synoptic station during the study period

۲۰۱۰ تاکنون بارش‌های بهاره افزایش یافته و در مقابل کاهش بارندگی در فصول پاییز و زمستان (نیمه نخست سال آبی) به جز سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳، نسبت به وضعیت نرمال وجود دارد که اثر منفی این وضعیت بر محصولات کشاورزی بومی منطقه (زرشک و زعفران) به‌خوبی مشهود است. همچنین کاهش بارندگی در نیمه نخست سال آبی (فصل غالب بارندگی منطقه) اثرات شدیدی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی بر جای گذاشته‌اند و در مقابل، ترسالی‌های شدید عمدتاً مقطعی و کوتاه‌مدت بوده و قادر به جبران کسری آب ناشی از خشکسالی‌های مداوم نیست. مقایسه دو نیمه سال آبی نشان می‌دهد که نوسانات فصلی نقش مهمی در شدت‌گیری یا کاهش اثر خشکسالی دارند؛ به‌طور مثال در سال ۱۹۹۷، نیمه اول سال با مقدار شاخص $0.61-$ (شرایط نرمال) و نیمه دوم سال با مقدار 1.80 (ترسالی شدید) را نشان می‌دهد که بیانگر ناهمگنی زمانی بارش در منطقه است. بر اساس نتایج، دهه ۲۰۰۰ پرریسک‌ترین دهه از نظر تداوم خشکسالی بوده و مقدار آن با گذشت زمان تشدید شده است. شکل ۸ تغییرات مقادیر SPI-6 را برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

بررسی شاخص SPI-3 در مقیاس فصلی نشان می‌دهد که پاییز بیشترین نوسان مثبت مقدار SPI-3 را دارد و وقوع ترسالی‌های شدید در سال‌های ۱۹۹۲ (۲/۰۷)، ۲۰۰۵ (۲/۰۸) و ۲۰۲۰

تحلیل سری زمانی شاخص SPI-6 در بازه زمانی سال‌های آبی ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه دچار نوسانات بارشی شدید با الگوهای خشکسالی و ترسالی متناوب بوده است. حداقل مقدار شاخص معادل $2.43-$ در نیمه نخست سال آبی ۲۰۲۱ به ثبت رسید که معرف خشکسالی‌های بسیار شدید با احتمال وقوع کمتر از ۲٪ (بر اساس توزیع نرمال استاندارد) است. بیشترین مقدار مثبت SPI-6 نیز در نیمه نخست سال ۲۰۲۰ با مقدار 2.01 ، بیانگر ترسالی بسیار شدید است. تحلیل فراوانی داده‌ها نشان می‌دهد که در ۶۷/۵۷٪ سال‌های مورد مطالعه، بازه‌های ۶ ماهه اول یا دوم سال وضعیت نرمال (-1 تا $+1$) بارندگی را تجربه نموده‌اند و شرایط خشکسالی به‌ترتیب بر ۱۰/۸۱٪ و ۱۸/۹۲٪ نیمه‌های نخست و دوم سال‌های آبی و شرایط ترسالی به‌ترتیب بر ۲۱/۶۲٪ و ۱۳/۵۱٪ نیمه‌های نخست و دوم سال‌های آبی حاکم بوده است. بنابراین بیشترین سهم خشکسالی‌ها به نیمه دوم سال‌های آبی (بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹) اختصاص دارد و بیانگر کاهش بارندگی در فصل بهار در منطقه مورد مطالعه است زیرا این منطقه در تابستان بارندگی خاصی ندارد و بارندگی‌های بسیار محدودی در این فصل گزارش شده است. لذا خشکسالی‌های فصل بهار بر برخی محصولات کشاورزی منطقه (وابسته به بارش‌های بهاره) در بازه زمانی مذکور تأثیر منفی گذاشته است. از سال



شکل ۸. تغییرات مقادیر SPI-6 (در شش ماه اول (SPI-6(1)) و دوم (SPI-6(2) سال آبی) برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه

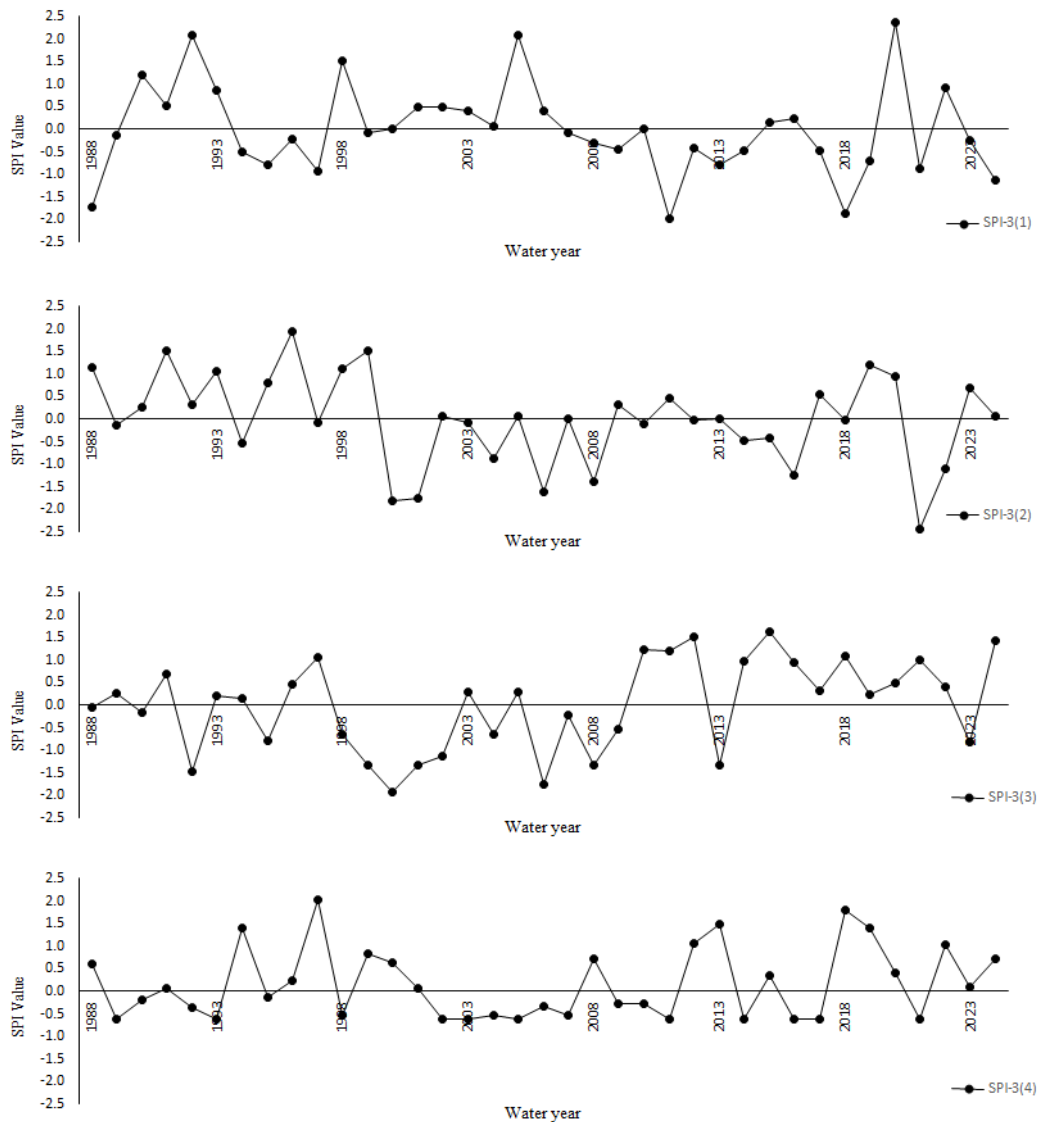
Fig 8. Variations of SPI-6 values (the first six months (SPI-6(1)) and the second six months (SPI-6(2)) of the water year) at the Qaen synoptic station during the studied period

به‌عنوان داده پرت بالقوه انجام شد. برای ارزیابی اثر این داده بر نتایج، شاخص SPI-12 یک‌بار با در نظر گرفتن همه داده‌ها و بار دیگر با حذف مقدار مذکور محاسبه گردید. مقایسه دو حالت نشان داد که حذف این داده تغییر معنی‌داری در الگوی کلی خشکسالی و ترسالی ایجاد نکرده و روندهای اصلی نتایج حفظ شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شاخص SPI در این مطالعه نسبت به وجود داده‌های پرت حساسیت بالایی ندارد و نتایج از پایداری مناسبی برخوردارند. همچنین برای بررسی حساسیت نتایج نسبت به نوع توزیع آماری، شاخص SPI-12 علاوه بر توزیع گاما با توزیع لگ نرمال نیز محاسبه گردید. مقایسه مقادیر حاصل نشان داد که هر دو توزیع الگوی مشابهی از نوسانات ترسالی و خشکسالی ارائه می‌دهند و سال‌های بحرانی به‌صورت یکسان شناسایی شدند. برای مثال، هر دو توزیع سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ را به‌عنوان دوره‌های خشکسالی شدید و سال‌های ۱۹۹۱، ۱۹۹۶، ۱۹۹۸ و ۲۰۲۰ را به‌عنوان ترسالی شدید معرفی کردند. با این حال، اختلافات جزئی در شدت شاخص بین دو توزیع مشاهده شد؛ به‌طور مثال در سال ۲۰۲۱ مقدار SPI-12 در توزیع گاما برابر با $-2/20$ و در توزیع لگ‌نرمال برابر با $-2/46$ محاسبه گردید که هر دو بیانگر خشکسالی بسیار شدید هستند، هرچند شدت خشکسالی در توزیع لگ‌نرمال کمی بیشتر برآورد شده است. به‌طور کلی بر اساس نتایج، انتخاب توزیع آماری (گاما یا لگ‌نرمال) موجب

بیانگر غالب بودن رخداد‌های ترسالی کوتاه‌مدت در ابتدای سال آبی است. در مقابل، زمستان بحرانی‌ترین فصل از نظر خشکسالی بوده و مقادیر SPI-3 برابر $-1/79$ در سال ۲۰۰۰، $-1/75$ در سال ۲۰۰۱ و $-2/42$ در سال ۲۰۲۱ شدیدترین کسری بارش را نشان می‌دهد. بهار نیز تداوم خشکسالی‌های زمستان را منعکس کرده و سال‌های ۲۰۰۰ ($-1/93$)، ۲۰۰۱ ($-1/31$) و ۲۰۰۶ ($-1/75$) گویای کاهش بارش در حساس‌ترین بازه رشد گیاهان است. در منطقه مورد مطالعه تابستان به‌عنوان فصل بارندگی محسوب نمی‌شود و مقادیر SPI-3 در این فصل با واقعیت هواشناسی و اقلیمی منطقه همخوانی ندارد. بنابراین به‌طور کلی الگوی فصلی تغییرات SPI-3 بیانگر آن است که زمستان و بهار به‌عنوان فصول بحرانی خشکسالی و پاییز به‌عنوان فصل ترسالی‌های مقطعی نقش دارند؛ موضوعی که می‌تواند در مدیریت ریسک خشکسالی و برنامه‌ریزی منابع آب قاین تعیین‌کننده باشد. شکل ۹ تغییرات مقادیر SPI-3 را برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

تحلیل حساسیت شاخص SPI

بررسی حساسیت نتایج به داده‌های پرت، با استفاده از مقدار بارندگی سال آبی ۲۰۲۰ با مقدار $306/38$ میلی‌متر (بالاتر از حد بالای تعیین‌شده توسط شاخص IQR [135/295 میلی‌متر])



شکل ۹. تغییرات مقادیر SPI-6 (در سه ماه اول (SPI-3(1))، دوم (SPI-3(2))، سوم (SPI-3(3)) و چهارم (SPI-3(4)) سال آبی) برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه

Fig 9. Variations of SPI-3 values (the first (SPI-3(1)), second (SPI-3(2)), third (SPI-3(3)), and fourth (SPI-3(4)) three-month periods of the water year) at the Qaen synoptic station during the study period

و دقت متفاوتی در شناسایی شدت و فراوانی خشکسالی دارند و مقایسه نتایج آن‌ها می‌تواند به انتخاب روش مناسب برای پایش دقیق‌تر خشکسالی در منطقه کمک کند.

با بررسی داده‌های ۳۷ ساله بارندگی، هم‌خوانی نتایج بین PNPI و SPI-12 در سال‌های با انحراف شدید از میانگین بارش به وضوح قابل مشاهده است. در سال‌هایی مانند ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ به ترتیب با ۷۷/۲۸، ۷۹/۰۱ و ۵۹/۸۹ میلی‌متر بارش، مقدار PNPI به کمتر از ۵۰٪ کاهش یافته که نشانگر خشکسالی شدید یا بسیار شدید است. در همین سال‌ها، مقدار SPI به کمتر از ۱/۵- رسیده و وضعیت خشکسالی شدید در

تغییر اساسی در روند و تفسیر خشکسالی یا ترسالی نمی‌شود و الگوی کلی، پایدار باقی می‌ماند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که محاسبات SPI-12 در این پژوهش نسبت به انتخاب توزیع حساسیت بالایی ندارد.

مقایسه عملکرد SPI و PNPI در تحلیل خشکسالی هواشناسی

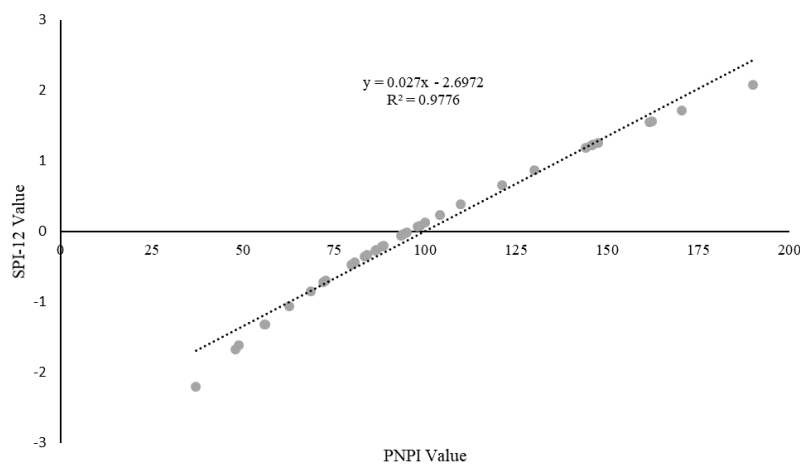
بررسی وضعیت خشکسالی در سطح شهر قاین طی دوره آماری سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۴ با استفاده از دو شاخص پرکاربرد SPI و PNPI انجام گرفت. هر یک از این شاخص‌ها ویژگی‌ها

می‌دهد. به‌طور نمونه، مقدار بارندگی در سال ۲۰۰۵ (۲۳۲/۲۳) میلی‌متر، طبق PNPI حدود ۱۴۴٪ میانگین درازمدت بوده و یک ترسالی بسیار شدید محسوب می‌شود. در حالی که این سال با مقدار SPI-12 برابر ۱/۱۸+، در محدوده نسبتاً مرطوب طبقه‌بندی می‌گردد. این رفتار بیانگر تبعیت همزمان SPI از مقدار و الگوی بارشی منطقه بوده و بنابراین ابزاری دقیق‌تر برای تحلیل اقلیم‌های ناپایدار محسوب می‌شود.

همچنین نتایج تحلیل‌ها، بیانگر هم‌بستگی بسیار قوی و مستقیمی بین شاخص‌های PNPI و SPI-12 در تحلیل خشکسالی منطقه است ($r \approx 0.99$) و با توجه به معنی‌داری آماری PNPI ($p < 0.05$) و SPI به‌طور مشابهی نوسانات بارش را نشان می‌دهند و تغییرات SPI تقریباً به‌طور کامل توسط نوسانات PNPI توضیح داده می‌شود. در شرایط خشکسالی‌های شدید نظیر سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ نیز این ارتباط در سطح بالایی حفظ شده است ($r \approx 0.998$) که بیانگر توانایی هر دو شاخص در شناسایی و پیش‌بینی شرایط کم‌بارش است. به همین ترتیب، در سال‌های ترسالی شدید مانند ۱۹۹۱، ۱۹۹۶ و ۲۰۲۰ نیز هم‌بستگی تقریباً کامل مشاهده شد ($r \approx 0.999$). این نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های SPI و PNPI نه تنها در شرایط عادی، بلکه در سال‌های مرزی نیز سازگاری بالایی دارند و می‌توان از آن‌ها به‌عنوان ابزارهای معتبر برای پیش‌بینی و ارزیابی نوسانات هیدرو اقلیمی استفاده کرد. این نکته با نتایج تحقیق شرن و داوراز (Şener & Davraz, 2024) در ارزیابی خشکسالی هواشناسی حوضه آبریز دریاچه Egirdir در ترکیه هم‌خوانی دارد. شکل ۱۰ نمودار تغییرات PNPI در مقابل PSI-12 را برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

منطقه را تأیید می‌کند. بنابراین در ترسالی و خشکسالی‌های شدید، حساسیت هر دو شاخص بالاست و بدون اختلاف جدی، تصویری هم‌راستا از شدت خشکسالی ارائه می‌دهند. همچنین SPI با ساختار نرمال‌سازی‌شده خود، در این سال‌ها نه‌تنها کاهش بارندگی بلکه انحراف آن از الگوهای رایج اقلیمی را نیز به‌خوبی بازتاب داده است.

با این حال، بیشترین اختلاف میان این دو شاخص در سال‌هایی با بارندگی در محدوده نرمال یا نزدیک به آن مشاهده می‌شود. به‌طور نمونه، در سال آبی ۱۹۹۴ با ثبت ۱۱۶/۴ میلی‌متر بارش، مقدار PNPI حدود ۷۲٪ میانگین درازمدت بوده که وضعیت خشکسالی متوسط را نشان می‌دهد. اما در همین سال به‌واسطه توزیع نامتوازن بارش‌ها در طی چند سال متوالی، مقدار SPI-12 به مقدار ۰/۷۲- رسیده و این شاخص وضعیت بارندگی را نرمال برآورد می‌کند. این اختلاف به‌دلیل تفاوت در ماهیت آماری این دو شاخص بوده و SPI با لحاظ نمودن انحراف معیار، پراکندگی و چولگی داده‌ها، نوسانات اقلیمی را بهتر آشکار می‌کند. در سال‌های آبی ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ به‌ترتیب با ۱۲۸/۷۶، ۱۱۷/۳۵ و ۱۱۰/۶۸ میلی‌متر بارندگی نیز همین اختلاف به چشم می‌خورد و در حالی که PNPI وضعیت خشکسالی خفیف تا متوسط را نشان می‌دهد، SPI-12 با توجه به ویژگی‌های آماری شاخصی بیشتر از ۰/۹۹- تولید کرده که بیانگر شرایط نرمال در منطقه است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که SPI نسبت به ساختار زمانی، فراوانی و توزیع بارش، نگرش اقلیمی تری دارد و فقط به حجم بارندگی بسنده نمی‌کند. از سوی دیگر، در سال‌هایی با بارش زیاد ولی تمرکز یافته در مدت کوتاه، SPI تصویر محافظه‌کارانه‌تری را نسبت به PNPI ارائه



شکل ۱۰. نمودار تغییرات PNPI در مقابل PSI-12 برای ایستگاه سینوپتیک قاین در بازه مورد مطالعه

Fig 10. Variations in SPI-6 values for the Qaen synoptic station during the studied period

چندین ایستگاه و ابزارهای پیش‌بینی کوتاه‌مدت و بلندمدت استفاده شود تا برآورد دقیق‌تری از پویایی خشکسالی در منطقه حاصل گردد. از منظر کاربردی، نتایج این تحقیق بیانگر افزایش ریسک خشکسالی در سال‌های اخیر است و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری مدیران محلی قرار گیرد. بنابراین بایستی پایش مستمر خشکسالی با استفاده از شاخص‌های ترکیبی در دستور کار نهادهای مرتبط قرار گیرد، در بخش کشاورزی اصلاح الگوی کشت و توسعه روش‌های آبیاری کارآمد دنبال شود و مدیریت برداشت آب‌های زیرزمینی با نظارت جدی‌تری اعمال گردد. همچنین ایجاد سامانه‌های هشدار سریع خشکسالی و گنجاندن نتایج چنین مطالعاتی در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای می‌تواند تاب‌آوری منطقه را در برابر تغییرات اقلیمی افزایش دهد.

منابع

- Aligolia, T., Majd, N. R., & Jaribi, A. H. (2019). Evaluation and comparison of drought in West Azerbaijan using the SPI, CZI, PNI indices and geographic information system (GIS). *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(1), 175-188. doi: <https://doi.org/10.22055/jise.2017.20678.1496>. (In Persian)
- Anonymous (2016). The 2016 national population and housing censuses. Statistical center of Iran. Available on: <https://amar.org.ir>.
- Anonymous (2024). The Qaen synoptic meteorological station data. Iran meteorological organization data center. Available on: <https://www.irimo.ir>.
- Asadi, A., Akbari, E., & Shafiey, N. (2020). Predicting the physical development of Qaen city using satellite images. *Spatial Planning*, 10(1), 67-84. doi: <https://dx.doi.org/10.22108/sppl.2019.114824.1336>. (In Persian)
- Bavand, P., Motesaffeh, B., & Hashem

به‌طور کلی، SPI نسبت به PNPI از قابلیت طبقه‌بندی دقیق‌تر و پایدارتری در ارزیابی خشکسالی هواشناسی یک منطقه برخوردار بوده و این نکته برای سال‌هایی با شرایط خشکسالی در مرز بین دو طبقه‌بندی مشهودتر است. همچنین، به‌دلیل استاندارد بودن SPI در سطح جهانی، استفاده از آن در مطالعات خشکسالی بلندمدت توصیه می‌شود. با این وجود، PNPI نیز به‌عنوان ابزاری ساده و سریع، در پایش اولیه وضعیت خشکسالی و ترسالی و هشدارهای کوتاه‌مدت، کاربرد مؤثری دارد. در مجموع، استفاده توأم از SPI و PNPI در مطالعات خشکسالی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌تواند تصویری جامع‌تر از وضعیت منابع آبی و نوسانات اقلیمی ارائه دهد و به تصمیم‌گیری بهتر در مدیریت خشکسالی کمک نماید.

نتیجه‌گیری

شهرستان قائنات به‌علت قرارگیری در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک، همواره با کمبود منابع آب و خشکسالی روبه‌رو بوده است. این مشکل در سال‌های اخیر با کاهش نزولات جوی، مدیریت غیراصولی منابع آب و برداشت بی‌رویه از آن‌ها، شدت یافته است. بنابراین در این تحقیق با استفاده از دو شاخص SPI و PNPI و داده‌های بلندمدت بارش و دمای سالیانه ایستگاه سینوپتیک شهر قاین (طی دوره آماری سال‌های آبی ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۴)، به بررسی خشکسالی هواشناسی در سطح شهر قاین پرداخته شد. بررسی داده‌های بارش و دما در شهر قاین طی دوره مورد مطالعه نشان داد که تغییرات بارش روند معناداری ندارد اما افزایش دمای میانگین سالیانه به‌عنوان عاملی مهم در تشدید خشکسالی‌های اخیر عمل کرده است. بر اساس نتایج، PNPI به‌دلیل سادگی، توانایی بالایی در پایش سریع و ابتدایی خشکسالی داشت، اما SPI با در نظر گرفتن تغییرپذیری آماری و قابلیت نرمال‌سازی داده‌ها، توانایی بیشتری در تفکیک شدت خشکسالی از خود نشان داد. هر دو شاخص در سال‌های با شرایط ترسالی یا خشکسالی شدید، رفتار مشابهی داشتند اما در سال‌های حد واسط، SPI طبقه‌بندی محافظه‌کارانه‌تری از وضعیت خشکسالی یا ترسالی ارائه می‌دهد. با این حال، مطالعه حاضر با محدودیت‌هایی همچون اتکا به داده‌های یک ایستگاه سینوپتیک و عدم بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی همراه بوده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از داده‌های

- precipitation index. *Natural Hazards*, 121(2), 2293-2322. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06906-5>.
- Elhoussaoui, A., Zaagane, M., & Benaabidate, L. (2021). Comparison of various drought indices for assessing drought status of the Northern Mekerra watershed, northwest of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(10), 915. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07269-y>.
- Gümüş, M. G., Çiftçi, H. Ç., & Gümüş, K. (2025). Determination of the performance of training algorithms and activation functions in meteorological drought index prediction with nonlinear autoregressive neural network. *Earth Science Informatics*, 18(2), 197. doi: <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01711-5>.
- Habibi, M., Babaeian, I., & Schöner, W. (2021). Changing causes of drought in the Urmia lake basin—increasing influence of evaporation and disappearing snow cover. *Water*, 13(22), 3273. doi: <http://doi.org/10.3390/w13223273>.
- Hajarian, A. (2025). Meteorological drought risk monitoring and zoning using Random Forest model. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(1), 83-94. doi: <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8551.1093>. (In Persian)
- Heidarzadeh, N., Eghbal, M., Esmaili, N., & Panaghi, K. (2024). Predicting the impact of climate change on the area of wetlands using remote sensing. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(6), 5593-5606. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04969-9>.
- Geloogrdi, S. (2024). Comparison of SPI, PNPI, RAI and SIAP indices in analyzing meteorological drought conditions in the Zohreh-Jarrahi watershed. *Journal of Arid Biome*, 14(2), 145-159. doi: <http://doi.org/10.29252/aridbiom.2025.22482.2036>. (In Persian)
- Foruzanmehr, M., & Khozaymehnezhad, H. (2023). Investigation of spatial and temporal changes of qualitative parameters of Qaen plain aquifer using interpolation methods. *Journal of Aquifer and Qanat*, 4(1), 1-15. doi: <https://doi.org/10.22077/jaaq.2023.5130.1045>. (In Persian)
- Chen, D., & Chen, H. W. (2013). Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: an example for 1901–2010. *Environmental Development*, 6, 69-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.007>.
- Choukri, M., Naimi, M., & Chikhaoui, M. (2023). Drought characterization: a systematic literature review. *SAINS TANAH-Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 20(2), 250-264. doi: <https://doi.org/10.20961/stjssa.v20i2.77206>.
- Cui, D., Liang, S., & Wang, D. (2021). Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12(3), e701. doi: <https://doi.org/10.1002/wcc.701>.
- Değerli Şimşek, S., & Turhan, E. (2025). An evaluation of spatiotemporal changes of meteorological drought in the Mediterranean sub-basins in Türkiye using discrepancy precipitation and standardized

- Adib, A. (2022). Drought monitoring and prediction using SPI, SPEI, and Random Forest model in various climates of Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 13(2), 383-406. doi: <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.287>.
- Lotfinasabasl, S., Khosroshahi, M., Saedifar, Z., & Dargahiyan, F. (2019). Precipitation trend analysis and drought assessment of Jazmorian basin using trend analysis methods and optimized drought indices. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25(4), 923-924. doi: <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.118624>. (In Persian)
- Mahmoudi, P., Rigi, A., & Miri Kamak, M. (2019). A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3), 3123-3138. doi: <https://doi.org/10.1007 / s00704-019-02778-z>.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 13(3), 245-259. doi: <https://doi.org/10.2307/1907187>.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22):179-183.
- Menna, B. Y., Mesfin, H. S., Gebrekidan, A. G., Siyum, Z. G., & Tegene, M. T. (2022). Meteorological drought analysis using copula theory for the case of upper Tekeze river basin, northern Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1), 621-630.
- Heydari Alamdarloo, E., Khosravi, H., Nasabpour, S., & Gholami, A. (2020). Assessment of drought hazard, vulnerability and risk in Iran using GIS techniques. *Journal of Arid Land*, 12(6), 984-1000. doi: <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0096-4>.
- Jeong, M. S., Park, S. Y., Kim, Y. J., Yoon, H. C., & Lee, J. H. (2024). Identification of propagation characteristics from meteorological drought to hydrological drought using daily drought indices and lagged correlations analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 55, 101939. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101939>.
- Kalvová, J., Halenka, T., Bezpalcová, K., & Nemešová, I. (2003). Köppen climate types in observed and simulated climates. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47(1), 185-202. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1022263908716>.
- Kartal, V., & Nones, M. (2024). Assessment of meteorological, hydrological and groundwater drought in the Konya closed basin, Türkiye. *Environmental Earth Sciences*, 83(9), 285. doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11587-1>.
- Kendall, M. G (1975) Rank correlation measures. Charles Griffin, London 212:15.
- Korkmaz, M., & Kuriqi, A. (2024). Regional climate change and drought dynamics in Tunceli, Turkey: insights from drought indices. *Water Conservation Science and Engineering*, 9(2), 49. doi: <https://doi.org/10.1007/s41101-024-00281-9>.
- Lotfirad, M., Esmaeili-Gisavandani, H., & ...

- Safdar, M., Shahid, M. A., Zaman, M., Rasul, F., Muzammal, H., Raza, A., Sabir, R. M., & Zafar, U. (2023). Drought monitoring with multiple indices and management through various techniques: a review. *Engineering Proceedings*, 56(1), 307. doi: <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-16602>.
- Şener, E., & Davraz, A. (2024). Comparison of drought indices in the analysis of temporal and spatial changes of climatic drought events: a case study in the Egirdir lake basin (Isparta/Turkey). *Natural Hazards*, 120(14), 12817-12849. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06711-0>.
- Singh, U., Agarwal, P., & Sharma, P. K. (2022). Meteorological drought analysis with different indices for the Betwa river basin, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(3):1741-1754. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04027-2>.
- Soylu Pekpostalci, D., Tur, R., Danandeh Mehr, A., Vazifekhah Ghaffari, M. A., Dąbrowska, D., & Nourani, V. (2023). Drought monitoring and forecasting across Turkey: a contemporary review. *Sustainability*, 15(7), 6080. doi: <https://doi.org/10.3390/su15076080>.
- Willeke, K., Lin, X., & Grinshpun, S. A. (1998). Improved aerosol collection by combined impaction and centrifugal motion. *Aerosol Science and technology*, 28(5), 439-456. doi: <https://doi.org/10.1080/02786829808965536>.
- Yuce, M. I., & Esit, M. (2021). Drought monitoring in Ceyhan basin, Turkey. *Journal of Applied Water Engineering and* 638. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04061-0>.
- Mersin, D., Gulmez, A., Safari, M. J. S., Vaheddoost, B., & Tayfur, G. (2022). Drought assessment in the Aegean region of Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 179(8), 3035-3053. doi: <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03089-7>.
- Miralizadeh, A., Hejabi, S. and Kouchakzadeh, M. (2023). Investigation of the hydrological drought of groundwater using HDMI index in Urmia plain. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(3), 57-72. doi: <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6432.1025>. (In Persian)
- Molaei, M., & Gravand, P. (2018). Investigation of PN, SIAP, RAI indices in Khuzestan province with emphasis on Ahwaz, Abadan, Dezful and Omidieh stations. *Water Engineering*, 6(2), 132-143. URL: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jwe/Article/1024412>. (In Persian)
- Oubaha, A., Ongoma, V., Hssaine, B. A., Bouchaou, L., & Chehbouni, A. (2024). Evaluation of the performance of meteorological drought indices in Morocco: a case study of different climatic zones. *International Journal of Climatology*, 44(11), 4009-4031. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.8565>.
- Porhemmat, J., & Altafi Dadgar, M. (2023). Analysis of hydrological drought indices in Alpine Zagros mountains of Iran. *Arabian journal of geosciences*, 16(11), 594. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11666-w>.

Research, 9(4), 293-314. doi: <https://doi.org/10.1080/23249676.2021.1932616>.

Zamani, H., Pakdaman, Z., Shakari, M., Bazrafshan, O., & Jamshidi, S. (2025). Enhancing drought monitoring with a multivariate hydrometeorological index and machine learning-based prediction in the south of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(9), 5605-5627. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36049-4>.

Zareiee, A. R. (2014). Evaluation of changes in different climates of Iran, using De Martonne index and Mann-Kendall trend test. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2(3), 2245-2261. doi: <https://doi.org/10.5194/nhessd-2-2245-2014>.

